УДК 629.018 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31

Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя

В. Е. Касьянов, Д. Б. Демченко, Е. Е. Косенко, С. В. Теплякова

Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. На протяжении длительного времени сохраняют актуальность вопросы повышения надежности машин с применением интегрального показателя. С позиций конструктивной безопасности рассмотрена эксплуатация элементов гидромеханического экскаватора.
Постановка задачи. Показаны метод и алгоритм, с помощью которых рассчитывается растяжка рабочего оборудования экскаватора.
Теоретическая часть. В рамках исследования определены способы повышения надежности с интегральным показателем надежности. Получены уравнения: для предела выносливости стали; для коэффициента концентрации напряжений; для действующего напряжения в опасном сечении и ресурса растяжки. Представлено распределение способов управления интегральным показателем надежности по стадиям жизненного цикла машины. Отмечено, что для получения оптимальной стратегии повышения надежности экскаватора необходимо минимизировать значение интегрального показателя надежности. Разработан метод комплексного анализа входных факторов, а для условий серийного и массового производства — общий комплекс рекомендаций по увеличению ресурса детали. Получено распределение недостатков по конструктивным, технологическим и эксплуатационным факторам для валов, осей, зубчатых колес, металлоконструкций, цепей, спец.деталей. Изложена методология создания практически безотказных машин, включающая принципы, комплексную программу и систему управления надежностью.
Выводы. Применение предложенной системы позволяет разрабатывать и изготавливать машины высокой надежности и обеспечивать планомерное снижение интегрального показателя надежности. Функционирование системы управления надежностью машин гарантирует их создание с таким уровнем надежности, который обеспечит конкурентоспособность техники и отсутствие претензий потребителей.

Ключевые слова: надежность машин, интегральный показатель надежности, гамма-процентный ресурс.

***Для цитирования*:** Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя / В. Е. Касьянов, Д. Б. Демченко, Е. Е. Косенко, С. В. Теплякова // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 1 — С. 23–31.

Method of machine reliability optimization using integral indicator

V. E. Kasyanov, D. B. Demchenko, E. E. Kosenko, S. V. Teplyakova

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. For a long time, the issues of improving the reliability of machines using the integral indicator have remained relevant. The operation of hydromechanical excavator elements is considered from the standpoint of structural safety.
Problem Statement. The paper shows the method and algorithm used to calculate the stretching of the excavator implement.
Theoretical Part. The study has identified the ways to improve reliability using the integral reliability indicator. The authors have obtained the equations: for the steel fatigue strength; for the stress concentration factor; for the effective stress in the dangerous section and the stretch life. The distribution of methods for managing the integral reliability indicator by the stages of the machine's life cycle is presented. It is noted that in order to obtain an optimal strategy for improving the excavator reliability, it is necessary to minimize the value of the integrated reliability indicator. The method of complex analysis of input factors is developed, and for serial and mass production — a general set of recommendations for increasing the component life. The distribution of disadvantages by structural, technological and operational factors for shafts, axles, gears, metal structures, chains, and special parts is obtained. The methodology for

creating virtually trouble-free machines, including principles, a comprehensive program and a reliability management system, is described.
Conclusion. The use of the proposed system makes it possible to develop and manufacture high-reliability machines and to ensure a systematic reduction in the integral reliability indicator. The functioning of the machine reliability management system guarantees their creation with the same level of reliability, which will ensure the competitiveness of the equipment and the absence of consumer complaints.

Key words: reliability of machines, integral reliability indicator, gamma-percentile life.

For citation: Kasyanov V. E., Demchenko D. B., Kosenko E. E., Teplyakova S. V. Method of machine reliability optimization using integral indicator: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2020;1: С. 23‒31.

Введение. Преждевременные отказы при эксплуатации машины значительно снижают ее ресурс. Более того, отказы могут спровоцировать ситуации, влияющие на безопасность эксплуатации спецтехники. Таким образом, актуальным вопросом является повышение надежности машины с применением интегрального показателя. С позиций конструктивной безопасности рассмотрена эксплуатация элементов гидромеханического экскаватора ЭО-4117.

Постановка задачи. В рамках представленной работы показаны метод и алгоритм, с помощью которых рассчитывается растяжка рабочего оборудования экскаватора ЭО-4117 [1–3].

Теоретическая часть

Определение способов повышения надежности с интегральным показателем надежности. Эмпирические интегральные кривые распределения параметров аппроксимируются кривой трехпараметрического закона Вейбулла, а *i*-е значение параметра зависимости рассчитывается по формуле

$$\mathrm{X} = C + \mathrm{A}\sqrt[\mathrm{B}]{-\ln \mathrm{P}(x)} \qquad (1)$$

с использованием значения вероятности $\mathrm{P}(x) = 1 - F(x)$ разыгрываемой случайной величины, которая вычисляется с помощью таблицы равномерно распределенных случайных чисел от 0 до 1 (генератор случайных чисел).

Ниже представлены полученные уравнения.

— Для предела выносливости стали 15ХСНД:

$$F(\sigma_{-1}) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\sigma_{-1} - 168{,}8}{6{,}04}\right)^{2,57}\right]. \qquad (2)$$

— Для коэффициента концентрации напряжений (от шероховатости поверхности растяжки):

$$F(k_{F\sigma}) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\mathrm{K}_{F\sigma} - 0{,}85}{0{,}07}\right)^{2,65}\right]. \qquad (3)$$

— Для действующего напряжения в опасном сечении растяжки:

$$F(\sigma_{св}) = 1 - exp\left[-\left(\frac{65{,}0 - \sigma_{св}}{12{,}1}\right)^{2,32}\right]. \qquad (4)$$

— Для ресурса растяжки:

$$F(\mathrm{T}_p) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\mathrm{T}_p - 10{,}1}{28{,}1}\right)^{1,49}\right]. \qquad (5)$$

Рассмотрев структуру интегрального показателя надежности и проанализировав результаты расчетов единичных показателей надежности, установили управляемые показатели (параметры). Управляющие воздействия для изменения значений управляемых показателей являются способами (мероприятиями) повышения надежности (табл. 1).

Таблица 1

Распределение способов управления интегральным показателем надежности
по стадиям жизненного цикла машины

	Способы управления интегральным показателем надежности
Стадия разработки	1. Увеличение ресурса деталей лимитирующей группы. 2. Оптимизация номенклатуры и количества запасных частей. 3. Оптимизация допусков на параметры деталей, обусловливающих рассеивание ресурса. 4. Увеличение периодичности и уменьшение объема операций технического обслуживания. 5. Оптимизация номенклатуры и количества запасных частей, инструментов и принадлежностей. 6. Корректировка конструкции машины для уменьшения трудоемкости замены деталей и сборочных единиц. 7. Оптимизация ресурса, массы и стоимости деталей с усталостными отказами. 8. Снижение металлоемкости деталей и сборочных единиц, не отказывающих за ресурс (срок службы). 9. Оптимизация системы диагностирования машин. 10. Оптимизация объема и периодичности предупредительных замен деталей (сборочных единиц). 11. Оптимизация объема и периодичности текущего ремонта машины.
Стадия производства	12. Введение и оптимизация: — входного контроля основных материалов и комплектующих; — операционного контроля изготавливаемых деталей; — выходного (приемочного) контроля.
Стадия эксплуатации	13. Выборочная реализация способов с 1 по 11 на основе анализа эксплуатационной информации о надежности серийных (массовых) машин в различных условиях эксплуатации.

Синтезированы структуры интегрального показателя надежности, способы повышения надежности экскаватора и снижения ее интегрального показателя (рис. 1).

СТАДИЯ РАЗРАБОТКИ

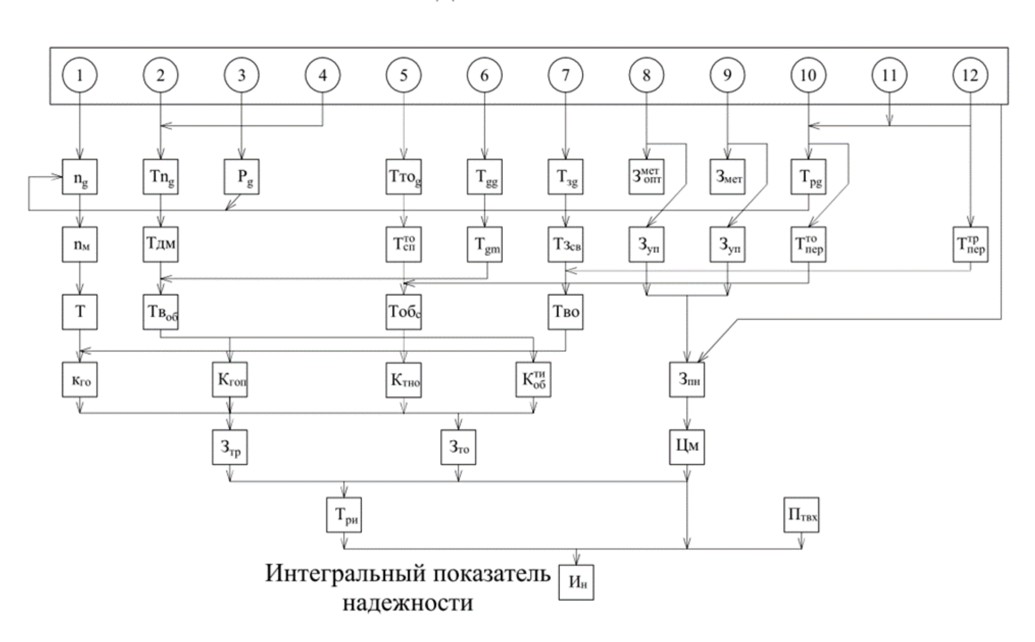


Рис. 1. Связь способов повышения надежности с интегральным показателем надежности

Определение способов управления интегральным показателем. Для получения оптимальной стратегии повышения надежности экскаватора необходимо минимизировать значение интегрального показателя надежности:

$$И_Н = f\left(C_{cj}\right) \to min,\ \ j = 1,2,...,n. \tag{6}$$

Здесь C_{cj} — удельные суммарные затраты. Они включают эксплуатационные затраты, ущерб от недостаточной надежности, затраты на разработку и внедрение *j*-й стратегии повышения надежности машины:

$$C_{cj} = \sum_{i=1}^{n} C_{ci},\ \ i = 1,2,...,m, \tag{7}$$

где C_{ci} — удельные суммарные затраты (включают эксплуатационные затраты от недостаточной надежности, затраты на разработку и внедрение *i*-го способа повышения надежности машины).

Построение оптимальной стратегии управления процессом повышения надежности машин заключается в оптимизации каждого шага управления — реализации способа (мероприятия) M_i в соответствии с вырожденной задачей динамического программирования [4–6].

В качестве критерия оптимальности ω_i шага управления U принята эффективность от повышения показателей надежности $К_j$ машины:

$$\omega_i = Э_i / З_i,$$

где $Э_i$ — экономический эффект от применения способа M_i; $З_i$ — затраты на разработку и реализацию способа M_i.

Эффективность на *i*-м шаге управления

$$\omega_i = \omega_i\left(k_j, U\right), \tag{8}$$

а оптимальная стратегия управления имеет вид

$$k_{jc} \to u_1\left(k_{jc}\right) \to k_{j1} \to u_2\left(k_{j1}\right) \to ... \to k_{jm-1} \to u_m\left(k_{jm-1}\right) \to k_{jm}. \tag{9}$$

Стратегия оптимального управления зависит от ограничительных условий по срокам или средствам (в большинстве случаев одновременно по этим двум показателям) на разработку и реализацию мероприятий. Дополнительное условие задачи — вынужденная последовательность в реализации некоторых мероприятий.

Аддитивный показатель эффективности за все шаги процесса:

$$W_i\left(k\right) = \max_{U_i}\left\{w_i\left(k_j, U\right) + W_{i+1}\left(F_i\left(k_j, U_i\right)\right)\right\} \tag{10}$$

при условии, что максимальная эффективность должна быть получена в кратчайшие сроки, т. е.

$$w_i = \left(k_{ji}, U_i\right) \geq w_{i+1}\left(k_{j+1}\right). \tag{11}$$

Значение показателя надежности для *i*-го шага управления:

$$k_{ji} = F\left(k_{ji-1}, U_i\right). \tag{12}$$

Разработаны три варианта стратегии для повышения надежности экскаваторов, вычислены суммарные эффективности мероприятий.

Повышение конструктивной надежности машин. Рассматривая способы повышения конструктивной надежности машин, целесообразно показать принципы установления и классификации причин отказов деталей, вызываемые отклонением какого-либо параметра (фактора) прочности и нагруженности от номинального значения (или выход за поле допуска). Комплексный (системный) анализ параметров и их структуры позволяет установить выпадающие параметры, определить доли их влияния на ресурс детали. Для установления причин усталостных отказов применен функциональный метод, с помощью которого определена связь между входными и выходными параметрами (ресурсами) детали (рис. 2).

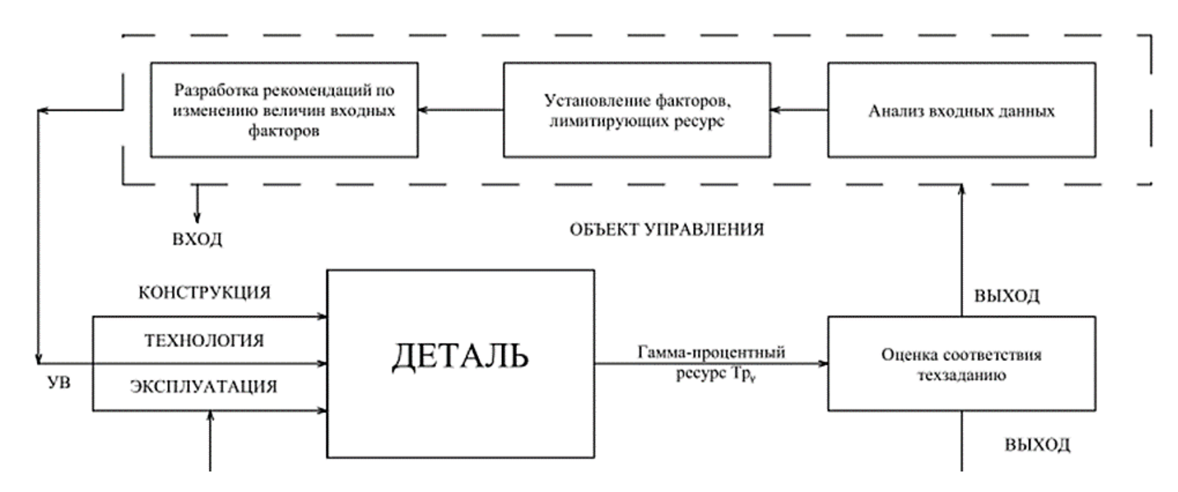


Рис. 2. Блок-схема функционального метода определения причин отказов и увеличения гамма-процентного ресурса деталей

Разработан метод комплексного анализа входных факторов (рис. 3), а для условий серийного и массового производства — общий комплекс рекомендаций по увеличению ресурса детали [7, 8].



Рис. 3. Структура комплексного анализа входных факторов детали

Получены условия (в зависимости от необходимой информации), при которых следует применить одну из трех разработанных функциональных моделей. Применена функциональная модель с тензометрированием и уточненными параметрами для установления причин отказа и увеличения ресурса оси в подвеске стрелы экска-

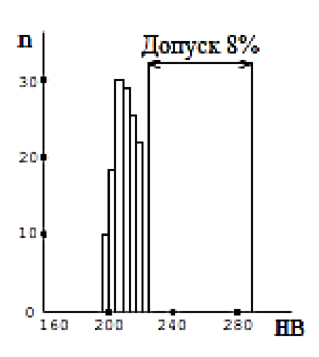
ватора Э-652Б. Другая функциональная модель (с уточненными параметрами) использована для зубчатых колес, валов, металлоконструкций экскаваторов Э-652Б, ЭО-4111В, ЭО-3322А, ЭО-3322Б.

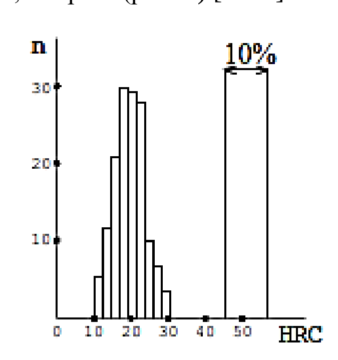
В результате исследований по устранению причин отказов разных деталей экскаваторов Э-652Б, ЭО-4111В, ЭО-3322А, ЭО-3322Б с использованием функционального метода получено следующее распределение недостатков по конструктивным, технологическим и эксплуатационным факторам:

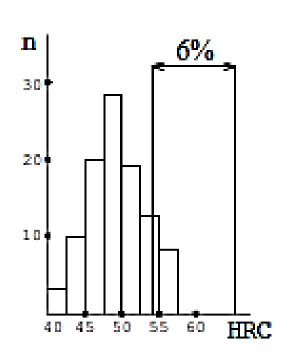
— валы и оси — 29 %, 59 % и 12 %;
— зубчатые колеса — 36 %, 55 % и 9 %;
— металлоконструкции (рамы, стрелы, рукоять, ковш) — 31 %, 51 % и 18 %;
— цепи с шагом 14,5 и 87,1 мм — 34 %, 62 % и 5 %;
— спецдетали — 42 %, 51 % и 7 %;
— средние значения — 34 %, 55 % и 11 %.

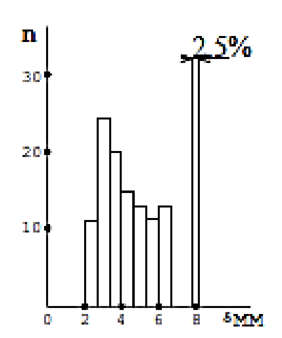
По конструкции внедрены 37 % рекомендаций, по технологии — 28 %, по оборудованию — 5 %, по оснастке — 11 %, по контрольным операциям — 19 %.

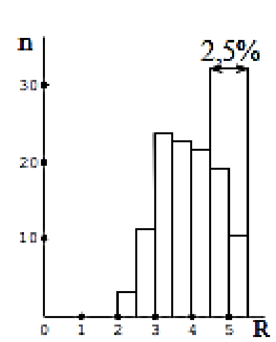
Установлено, что в ряде случаев причинами низкого ресурса являются значительные отклонения параметров нагруженности и несущей способности. Так, радиусы галтелей валов и шлицев занижены в 2–3 и более раз. Шероховатость поверхности выкружек зубчатых колес, галтелей валов значительно ниже требований чертежа. Катеты сварных швов металлоконструкций занижены в 2–3 раза. Твердость поверхности и сердцевины валов, зубчатых колес, цепей ниже требований чертежа в 1,2–2 раза (рис. 4) [9–12].











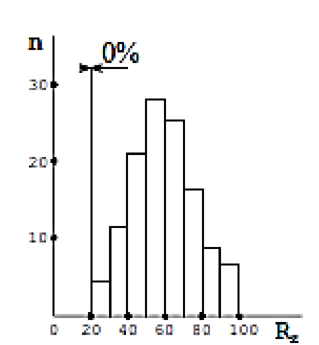


Рис. 4. Рассеивание значений параметров деталей и допуска в чертежах: HB — твердость по методу Бринелля, HRC — твердость по методу Роквелла, n — выборочные значения

Из выборочного анализа деталировочных чертежей нескольких моделей экскаваторов с механическим и гидравлическим приводом видно, что допуски на указанные параметры почти не устанавливаются. В рабочих

чертежах на разные детали имеется до 50–80 и более размеров, а также данные о прочности. Однако всего 2–5 размеров, включая прочностные данные, влияют на рассеивание ресурса детали.

Разработаны теоретические основы многоуровневой связи допусков на параметры нагруженности и несущей способности с ресурсом детали. Получена многовариантная зависимость коэффициента изменения ресурса детали от коэффициентов изменения нагруженности и несущей способности (степенная зависимость с показателем степени от 1 до 20). Составлена структура факторов выносливости и нагруженности. Классифицированы виды параметров детали (геометрические, прочностные и динамические), а также виды ее факторов (простые и сложные). Получена структура основного состава факторов и параметров типовых деталей в системе «фактор — параметр — значение — допуск на коэффициент увеличения или снижения несущей способности или нагруженности — этот коэффициент с допуском — допуск на параметр». Рассмотрены виды статистических распределений значений параметров детали в зависимости от особенностей технологических процессов. Сопоставлены плотности распределения ресурса детали в двух случаях: с допусками и без допусков на параметры деталей [13–15].

Изложена методология создания практически безотказных машин, включающая принципы, комплексную программу и систему управления надежностью. На основе обобщения накопленного опыта по обеспечению надежности впервые сформулированы 16 принципов создания практически безотказных машин (табл. 2).

Таблица 2

Принципы создания практически безотказных машин

1.	Изменение надежности машины влечет изменение затрат на ее разработку, производство, эксплуатацию	9.	Для основных параметров деталей назначаются допуски, обеспечивающие приемлемое рассеивание их ресурса
2.	Для измерения изменения надежности машины применять один показатель, обобщающий все свойства надежности (т. е. интегральный показатель надежности)	10.	Рассматривая случайные величины (прочность, нагруженность, наработка), ограниченные сверху или (и) снизу, применять для аппроксимации теоретические законы с аналогичными ограничениями (пределами)
3.	Для оценки изменения и оптимизации надежности машины (элемента) использовать в качестве интегрального показателя удельные суммарные затраты на ее разработку, производство, эксплуатацию	11.	Для расчета функции распределения и минимального ресурса детали применять зависимости, связывающие ресурс с несущей способностью и нагруженностью, и метод Монте-Карло
4.	Практически безотказный ресурс машины должен быть оптимальным	12.	Расчетная надежность машины подтверждается экспериментально до начала серийного производства: за полный ресурс машины и с приемлемой достоверностью
5.	Минимальный ресурс каждой детали должен быть больше заданного (оптимального) ресурса машины $min\,T_{Pgi} > T_{PИopt}$	13.	Контроль в производстве обеспечивает заданное рассеивание несущей способности детали
6.	Допускаются плановые замены некоторых деталей	14.	Конструкция, технические параметры и условия эксплуатации машины обеспечивают заданное рассеивание нагруженности
7.	Для деталей возможны редкие случайные отказы, причины которых нельзя установить, так как нет необходимых методов и технических средств	15.	Техническое обслуживание (смазка, регулировка, диагностирование и т. п.) машины поддерживает заданный уровень ее надежности
8.	Для плановых замен выпускать запасные части, для устранения случайных отказов иметь запас деталей	16.	Если условия испытаний опытных машин (узлов, деталей) соответствуют не всем эксплуатационным условиям, необходимо дополнительно получить информацию о надежности серийных машин

Эти принципы составили теоретическую основу методологии системного поэтапного обеспечения надежности на всех трех стадиях жизненного цикла машины. Основополагающий принцип создания практически безотказных машин: минимальный ресурс каждой детали (параметр сдвига, трехпараметрическое распределение Вейбулла) должен быть больше заданного ресурса машины.

Технико-экономические расчеты при проектировании гидромеханического экскаватора ЭО-4117 показали, что затраты на ремонт сокращаются в 10–20 раз, а интегральный показатель надежности — в 3–6 раз. Для повышения ресурса машины с 10 до 20 тыс. ч потребуется увеличить, например, сечение металлоконструкций на 19 %, деталей трансмиссии — на 9 %. Стоимость стали для одного экскаватора возрастает на 0,45 тыс. руб. (с 3 до 3,45), а цена — с 20 до 20,45 тыс. руб., т. е. на 2,3 %. Интегральный показатель надежности снижается в 1,97 раза, а масса экскаватора увеличивается примерно на 15 %.

Выводы. Применение предложенной системы позволяет разрабатывать и изготавливать машины высокой надежности и обеспечивать планомерное снижение интегрального показателя надежности. Функционирование системы управления надежностью машин гарантирует их создание с таким уровнем надежности, который обеспечит конкурентоспособность техники и отсутствие претензий потребителей.

Библиографический список

1. Труханов, В. М. Расчет проектной надежности технических систем по постепенным отказам / В. М. Труханов // Контроль. Диагностика. — 2015. — № 1. — С. 70–72.

2. Капур, К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. — Москва : Машиностроение, 1980. — 604 с.

3. Касьянов, В. Е. Требования к безотказности комплектующих изделий зерноуборочных машин / В. Е. Касьянов, Д. М. Беленький, Н. Л. Вернези // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1989. — № 9. — С. 14–15.

4. Прогнозирование надежности машин по результатам незавершенных испытаний / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич, Г. Ю. Гольштейн // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2 (16). — С. 3513–3517.

5. Касьянов, В. Е. Принципы создания практически безотказных машин / В. Е. Касьянов // Стандарты и качество. — 1988. — № 7. — С. 39–42.

6. Демьянов, А. А. Метод адаптивного синтеза фрикционных систем / А. А. Демьянов, А. А. Демьянов // Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-23. Подвижной состав железных дорог / Под ред. Б. А. Левина, П. С. Анисимова. — Москва : Машиностроение, 2008. — С. 72–74.

7. Демьянов, А. А. Адаптивный синтез фрикционно-механических систем / А. А. Демьянов, А. А. Демьянов // Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса : тр. междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону : РГУПС, 2009. — С. 44–45.

8. Демьянов, А. А. Некоторые аспекты повышения экономической эффективности транспортной инфраструктуры / А. А. Демьянов, А. А. Демьянов // Проблемы машиноведения. Трибология — машиностроению : мат-лы междунар. науч.-техн. конф. — Москва : ИМАШ РАН, 2012. — С. 212–216.

9. Демьянов, А. А. Синтез механических систем с подвижным основанием / А. А. Демьянов, А. А. Демьянов // Транспорт-2014 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. — Ростов-на-Дону : РГУПС. — 2014. — С. 299–301.

10. Капуста, П. П. Принципы обеспечения надежности ресурсного проектирования несущих систем мобильных машин / П. П. Капуста // Грузовик. — 2013. — № 3. — С. 22–31.

11. Касьянов, В. Е. Основы теории и практики создания надежных машин / В. Е. Касьянов, Т. Н. Роговенко, Л. П. Щулькин // Вестник машиностроения. — 2003. — № 10. — С. 3–6.

12. Касьянов, В. Е. Повышение надежности и эффективности работы машины на основе увеличения усталостного ресурса деталей / В. Е. Касьянов, В. В. Дудникова // Вестник машиностроения. — 2009. — № 11. — С. 11–15.

13. Расчет прочностной надежности и усталостной долговечности элементов конструкций мобильных машин, нагруженных случайными изгибающими и крутящими моментами / А. С. Гусев, В. И. Щербаков, С. А. Стародубцева, М. И. Гребенкина // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. — 2013. — Т. 1, № 2 (16). — С. 54–57.

14. Теплякова, С. В. Расчетно-экспериментальное определение максимальной нагруженности стрелы одноковшового экскаватора / С. В. Теплякова, А. А. Котесова, Е. Е. Косенко // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. — 2016. — № 2 (48). — С. 38–43.

15. Алгоритм определения параметров прочности, нагруженности и ресурса с помощью аналитического перехода от выборочных данных к данным совокупности / В. Е. Касьянов, Л. П. Щулькин, А. А. Котесова, С. В. Котова // Инженерный вестник Дона. — 2012. — Т. 23, № 4-2 (23). — С. 120.

Сдана в редакцию 12.12.2019
Запланирована в номер 20.01.2020

Об авторах

Касьянов Валерий Евгеньевич, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6870-7673, spu-56.2@donstu.ru.

Демченко Денис Владимирович, доцент кафедры «Градостроительство и проектирование зданий» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0904-5681, denis2711@yandex.ru.

Косенко Евгений Евгеньевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0515-98493, a123lok@mail.ru.

Теплякова Светлана Викторовна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4245-1523, svet-tpl@yandex.ru.

Заявленный вклад соавторов

В. Е. Касьянов — научное руководство, формулирование основной идеи исследования, проверка формулировок и терминологии. Д. В. Демченко — анализ литературных источников, контроль адекватности проведения исследований. Е. Е. Косенко — проведение исследований, участие в теоретическом исследовании, постановка и описание научного эксперимента. С. В. Теплякова — проведение исследований, участие в постановке научного эксперимента, описание научного эксперимента.

Submitted 12.12.2019
Scheduled in the issue 20.01.2020

Information about the authors

Valeriy E. Kasyanov, Professor, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1), Doctor of technical sciences, Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6870-7673, spu-56.2@donstu.ru.

Denis V. Demchenko, Associate professor, Department of Urban Planning and Building Design, Don State Technical University (Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1), Candidate of technical sciences, Associate professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0904-5681, denis2711@yandex.ru.

Evgeniy E. Kosenko, Associate professor, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1), Candidate of technical sciences, Associate professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0515-98493, a123lok@mail.ru.

Svetlana V. Teplyakova, Associate professor, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (Russian Federation, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1), Candidate of technical sciences, Associate professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4245-1523, svet-tpl@yandex.ru.

Contribution of the authors

V. E. Kasyanov — scientific supervision, formulation of the main idea of research, verification of formulations and terminology. D. V. Demchenko — analysis of literary sources, control of the adequacy of the research. E. E. Kosenko —research, participation in theoretical research, setting up and description of scientific experiment. S. V. Teplyakova —research, participation in the formulation of scientific experiment, description of scientific experiment.